DOI: 10.5846/stxb201605241005
张盛,王铁宇,张红,李奇锋,周云桥,宋帅.多元驱动下水生态承载力评价方法与应用——以京津冀地区为例.生态学报,2017,37(12):4159-4168.
Zhang S, Wang T Y, Zhang H, Li Q F, Zhou Y Q, Song S.Using a multivariate-driven model to evaluate water ecological carrying capacity: Method-building and application in the Beijing-Tianjin-Ji (Hebei Province) region.Acta Ecologica Sinica,2017,37(12):4159-4168.

多元驱动下水生态承载力评价方法与应用
——以京津冀地区为例

张 盛[1,2],王铁宇[2,3,*],张 红[1],李奇锋[2,3],周云桥[2,3],宋 帅[2]

1 山西大学环境与资源学院,太原 030006
2 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室,北京 100085
3 中国科学院大学,北京 100049

摘要:水生态承载力通常是指在维持水生态系统自身及其支持系统健康的前提下,基于一定的生态保护和承载目标,自然水生态系统所能支撑的人类活动的阈值。从水生态承载力的概念出发,基于水资源、水环境和社会经济等要素,筛选出水资源利用率、污水处理率、万元 GDP 用水量等 16 个指标对水生态承载力评价的多元耦合作用进行分析,量化驱动因子与水生态承载力之间的关联度,建立了具有多元驱动功能的粒子群引力搜索算法-投影追踪(PSOGSA-PP)水生态承载力评价模型。并以京津冀地区为例,解析了区域水资源和水环境的生态效益,以及经济社会效益最大化的内在驱动,评价了水生态承载力并阐明其影响因素。进一步设定不同时间段的水生态承载力情景方案,通过具有较高寻优精度和较好算法执行能力的粒子群引力搜索算法,利用最佳投影方向 $\bar{a}$ 分别计算分级标准阈值的投影值 $z'(i)$ 和评价实例的投影值 $z''(i)$,基于投影值 $z'(i)$ 构造水生态承载力评价等级,实现了水生态承载力的分级评价,结果表明,在多元因子共同驱动下,2008 年—2030 年京津冀所属 13 个地区的水生态承载力在波动中呈好转趋势,逐步由Ⅳ级(超载)、Ⅴ级(严重超载)向趋于Ⅱ级(比较理想)状态的演变,张家口市始终保持着Ⅱ级水平,并在 2030 年达到Ⅰ级(理想)的临界值。研究成果将为京津冀一体化的水资源开发利用与水源生态涵养提供重要的决策支持。

关键词: 水生态承载力;多元驱动;评价方法与应用;京津冀地区;情景模拟

Using a multivariate-driven model to evaluate water ecological carrying capacity: Method-building and application in the Beijing-Tianjin-Ji (Hebei Province) region

ZHANG Sheng[1,2], WANG Tieyu[2,3,*], ZHANG Hong[1], LI Qifeng[2,3], ZHOU Yunqiao[2,3], SONG Shuai[2]

1 *College of Environment and Resource, Shanxi University, Taiyuan* 030006, *China*
2 *State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100085, *China*
3 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

Abstract: Water ecological carrying capacity refers to the degree that natural aquatic ecosystems can support human activities under certain conservation goals, while maintaining ecosystem quality. To explore this concept, which is based on water resources, environmental conditions, and socioeconomic factors, 16 indicators were selected to analyze the multivariate coupling effect of water ecological carrying capacity and to quantify correlations between this effect and related

基金项目:国家自然科学基金项目(41571478);水体污染控制与治理科技重大专项(2015ZX07203-005);科技基础性工作专项(2013FY11110)
收稿日期:2016-05-24; **修订日期**:2016-09-05

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: wangty@rcees.ac.cn

driving factors. A particle swarm optimization gravitational search algorithm-projection pursuit (PSOGSA-PP) model with a function of multiple drivers was established to evaluate water ecological carrying capacity. The Beijing-Tianjin- Ji (Hebei Province) region was chosen as a case study for analyzing the drivers of ecological benefits of regional water resources and water quality and for maximizing the associated economic and social benefits, as well as to evaluate water carrying capacity and impact factors. Scenarios were developed based on carrying capacities during different periods, and water ecological carrying capacity evaluation levels were established using PSOGSAs and the optimal projection direction $\vec{a}$, the classification standard threshold projection$z'(i)$, and the projection value of evaluation instance$z''(i)$. Water carrying capacity exhibited an improving trend, from level IV (overload) and level V (extensive-overload) to level II (ideal), for 13 cities in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2008 to 2030; projections indicated, for instance, that Zhangjiakou City would remain at level II for the most of the period, and attain level I (ideal) by 2030. Our results offer support for the exploitation and utilization of water resources, as well as the protection of aquatic eco-systems, in the Beijing-Tianjin-Hebei region in the future.

Key Words: water ecological carrying capacity; multiple drivers; evaluation method and application; Beijing-Tianjin- Ji (Hebei Province); model-scenario simulation

水生态承载力以水循环过程为纽带,是指在保护水生态系统完整性下的水资源、水环境和社会经济要素共同作用的支撑能力。我国水生态系统问题由来已久,水资源过度开发、粗放利用和污染严重等问题突出。以水生态系统健康理念为核心的水生态承载力的相关研究日益引起国内外学者的广泛关注[1-2]。水生态承载力评价的根本宗旨是通过对关键指标的调控,在满足区域生态需水、栖息地环境和水质目标的前提下,评价区域可承载的最大人口数量和经济规模[3-4]。目前,水生态承载力的相关研究多集中在概念和评价方法上[4]。水生态承载力是一个多元动态的复合系统,多元性主要体现在其评价因子数量多,内容涉及面广[5];动态性主要体现在时间和空间上的动态变化[6],包括社会经济系统和水生态系统之间的相互影响;复合性主要体现其概念的组成上,涵盖了水资源承载力[7-10]、水环境承载力[11-13]和社会经济承载力等,兼具自然属性和社会属性。

国内外研究水生态承载力的方法主要包括生态足迹法[14-15]、系统动力学[10,16-27]和统计学方法[6,19-20]等。其中,生态足迹方法在评价水资源承载力方面,优点在于数据资料易获取,计算方法可操作性强且简便,着重反映自然资源与经济社会发展的互补关系,但缺乏对水质、水量以及生物需求的综合考虑[5]。系统动力学方法优势在于研究解决非线性问题,如辽宁太子湖流域[21]、新疆叶尔羌河流域[22]和太湖流域[16,23]生态承载力的评价应用,但是模型对于数据要求较高,参数率定繁琐,求解条件苛刻限制了其推广。统计学方法,包括线性回归、聚类分析、时间序列和主成分分析等,具有目标相对单一的缺点。多元驱动下的 PSOGSA-PP 水生态承载力评价模型,是利用粒子群引力算法求最优解,并采用投影追踪模型对最佳投影方向进行参数优化,有效的提高了模型的评价精度,具有参数少、易于操作、计算稳定性强和良好的全局搜索能力等优点[24]。该模型的优势在于借助粒子群引力搜索算法,多次运算,寻找最优投影方向,形成水生态承载力评价分级标准。本文将模型应用于京津冀地区,把北京、天津和河北省的 11 个地级市的水生态承载力进行分级评价,提出水生态承载力评价指标体系和分级标准,对于"京津冀一体化"新时期下协调区域水资源开发、水环境保护和区域社会经济发展具有理论和实践借鉴价值。

1 模型构建

1.1 水生态承载力评价指标体系

水生态承载能力评价是通过对关键指标的调控,在区域满足生态需水、栖息地环境和水功能分区水质目标的前提下,评价区域可承载的最大人口数量和经济规模[4]。本研究在水生态承载力评价指标选取时,采用

频数分析法对已有研究文献中的指标进行汇总、统计和筛选,将有关水资源、水环境的频数累计百分比超过80%的作为主要指标,紧扣水生态承载力的概念和内涵,依托京津冀的区域特征,剔除与概念不相关指标,参阅国家颁布的相关指标体系进行相应调整更新,综合考虑专家评判结果,最后将所遴选指标做相关性分析。在常规指标体系的基础上,增加了有关水管理和水利用方面的指标[17,25-27]。严格按照系统性、代表性、区域差异性、层次性、指标定量性和可操作性的选取原则。据此,从水资源、水环境、社会经济 3 方面,构建了区域水生态承载力评价指标体系,包括目标层、准则层和指标层(表 1)。

表 1　京津冀地区水生态承载力评价指标体系

Table 1　The indicators of water ecological carrying capacity in Jing-Jin-Ji(Hebei Province)**region**

目标层 A Target level	准则层 B Standard level	指标层 C Indicator level	单位 Unit	量化方法 Quantization method
水生态承载能力评价 Assessment of water ecological carrying capacity	水资源	水资源利用率 C_1	%	区域用水总量/区域水资源总量×100%
		水资源密度 C_2	$10^4 m^3/km^2$	区域水资源总量/区域国土面积
		人均水资源可利用量 C_3	m^3/人	区域水资源可利用量/区域总人口
		降水深 C_4	mm	区域降水高度/区域面积
	水环境	水功能区达标率 C_5	%	水功能区达标个数/水功能区总数×100%
		集中式供水水源达标率 C_6	%	集中供水水源地达标个数/集中式供水水源地总数×100%
		入河污染物总量达标率 C_7	%	水功能区 COD、NH_3-N 排放总量小于水功能区纳污能力个数/水功能区总数×100%
		污水处理率 C_8	%	废污水处理量/废污水排放总量×100%
	经济社会	万元 GDP 用水量 C_9	m^3	区域用水总量/区域 GDP
		万元工业增加值用水量 C_{10}	m^3	区域工业用水总量/区域工业增加值
		农田灌溉水有效利用系数 C_{11}	%	农业实际利用渠道净水总量/渠道取水总量×100%
		工业用水重复利用率 C_{12}	%	区域工业取水总量/区域(工业取水总量+重复利用总量)×100%
		用水总量控制红线达标率 C_{13}	%	辖区用水总量控制达标县(市)/辖区县(市)总数×100%
		计划用水实施率 C_{14}	%	区域计划用水总量/区域总用水量×100%
		取水许可实施率 C_{15}	%	区域取水许可总量/区域总用水量×100%
		入河排污口监控率 C_{16}	%	区域受监控污水排放量/区域污水排放总量×100%

水生态承载力是针对某一特定地区的相对概念,它既包含有横向上和其他地区的比较,也考虑了纵向时间上与过去的比较。最严格水资源管理制度和"水十条"的提出是一定时期及区域内开展水生态承载力研究的基础和前提。利用层次分析法,从水资源系统、水环境系统和经济社会系统(主要体现在水利用与水管理 2 个方面)遴选出 16 项指标构成水生态承载力评价指标体系,并对每个指标进行分区分级量化,将水生态承载力评价分为目标层 A、准则层 B 和指标层 C 3 个层次。构建符合区域水生态承载力评价指标分级标准,将水生态承载力分为"理想"、"较理想"、"临界"、"超载"和"严重超载"5 个等级,分别用 Ⅰ 级—Ⅴ 级表示[17-18,28-32],并确定各指标合理的上限值和下限值(表 2)。

需要指出,水生态承载力评价指标分级标准是相对的。由于地域条件的不同,所选取的评价指标各异,各指标之间的相互影响程度和各自权重大小也不同。利用指标体系,一个地区也可以评价随时间推移的水生态承载力变化情况,为环境政策制定和考核制度的实施提供技术依据。

1.2　PSOGA-PP 模型原理与技术路径

投影追踪(Projection Pursuit,PP)是用于处理和分析高维数据的一类新型统计方法,其基本原理是将高维数据构建某种组合投影到低维子空间上,通过极小化投影指标来反映原高维数据的结构或特征,并在低维空间上对数据结构进行分析,以达到研究和分析高维数据的目的[33-34]。在实际应用过程中,投影寻踪模型最佳

投影方向 $\vec{a}$ 的选取对于模型的泛化性能及评价结果有着关键的影响。本文以粒子群引力搜索算法[35] (Particle Swarm Optimization Gravitational Search Algorithm, PSOGSA)对投影寻踪模型最佳投影方向参数进行优化,它汲取了引力搜索算法的全局勘探能力和粒子群算法的局部搜索开发能力,具有良好的收敛精度和全局搜索能力[36-38]。引力搜索算法通过个体间的万有引力相互作用实现优化信息共享,引导群体向最优解区域搜索,具有较好的全局搜索能力,易陷入局部极值。粒子群优化算法是一种简单、高效的仿生物群体智能算法,其收敛速度快、局部搜索能力强。无论是高位单峰函数还是高位多峰函数,粒子群引力搜索算法的寻优效果都全面优于标准引力搜索算法和粒子群优化算法,表现出较高的寻优精度和较好的算法执行能力,这说明基于粒子群优化算法改进的引力搜索算法在高维复杂函数的寻优中具有较好的计算稳定性和全局搜索能力[39]。

表 2 京津冀地区水生态承载力评价指标分级标准

Table 2 The grading standard of water ecological carrying capacity y in Jing-Jin-Ji (Hebei Province) **region**

方法 Method	指标层 C Indicator level	Ⅰ级(理想) Ⅰ level (Ideal)	Ⅱ级(较理想) Ⅱ level (Relatively ideal)	Ⅲ级(临界) Ⅲ level (Critical)	Ⅳ级(超载) Ⅳ level (Overload)	Ⅴ级(严重超载) Ⅴ level (Severe overload)
评价等级	C_1	<50	[50,60)	[60,80)	[80,100)	≥100
Evaluation level	C_2	≥80	[60,80)	[40,60)	[20,40)	<20
	C_3	≥2000	[1500,2000)	[1000,1500)	[500,1000)	<500
	C_4	≥1000	[800,1000)	[600,800)	[400,600)	<400
	C_5	≥95	[80,95)	[60,80)	[40,60)	<40
	C_6	≥99	[90,99)	[80,90)	[70,80)	<70
	C_7	≥95	[80,95)	[60,80)	[40,60)	<40
	C_8	≥90	[80,90)	[70,80)	[50,70)	<50
	C_9	<60	[60,80)	[80,100)	[100,120)	≥120
	C_{10}	<10	[10,20)	[20,40)	[40,50)	≥50
	C_{11}	≥0.7	[0.6,0.7)	[0.5,0.6)	[0.4,0.5)	<0.4
	C_{12}	≥95	[80,95)	[60,80)	[40,60)	<40
	C_{13}	≥90	[80,90)	[70,80)	[50,70)	<50
	C_{14}	≥90	[80,90)	[70,80)	[40,70)	<40
	C_{15}	≥90	[80,90)	[70,80)	[40,70)	<40
	C_{16}	≥95	[85,95)	[70,85)	[50,70)	<50

[…)为数学符号,表示区间,区间是数集的一种表示形式;半开半闭区间 $\{x \mid a \leqslant x < b\} = [a, b)$

其中,PSOGA-PP 模型的主要算法过程如下[40]:

Step1 数据预处理。预设待评价的数据集为 $\{x(i,j) \mid i = 1,2,\cdots,n; j = 1,2,\cdots,m\}$,对于指标值越大其评价结果越高的指标采用以下公式进行数据处理:

$$x(i,j) = \frac{x(i,j) - x_{\min}(j)}{x_{\max}(j) - x_{\min}(j)} \tag{1}$$

式中, $x(i,j)$ 为第 i 组第 j 个评价指标值; $x_{\max}(j)$ 、$x_{\min}(j)$ 分别为评估数据集中第 j 个评价指标的最大值、最小值; n 、m 分别为数据集数量及评估数据数目。对于指标值越小其评价结果越理想的指标,对其取倒数乘100,再按(1)进行处理。

Step2 构造投影指标函数。投影追踪方法就是将 m 维数据 $\{x(i,j) \mid j = 1,2,\cdots,m\}$ 综合成 $a = \{a(1), a(2), \cdots, a(m)\}$ 为投影方向的一维投影值 $z(i)$:

$$z(i) = \sum_{j=1}^{m} \vec{a}(j)\, x(i,j) \tag{2}$$

式中, $\vec{a}$ 为单位长度向量。

确定投影指标时,要求投影值 $z(i)$ 的局部投影点尽可能密集,因此,构造的投影函数为:

$$Q(a) = S_z D_z \tag{3}$$

式中, S_z 为投影值 $z(i)$ 的标准差; D_z 为投影值 $z(i)$ 的局部密度,即

$$S_z = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (z(i) - \bar{z})^2/(n-1)} \tag{4}$$

$$D_z = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} [R - r(i,j)] \cdot o[R - r(i,j)] \tag{5}$$

式中, $\bar{z}$ 为序列 $z(i)$ 的平均值; R 为局部密度的窗口半径; $r(i,j)$ 为样本之间的距离; $o(\tau)$ 为单位阶跃函数,当 $\tau \geqslant 0$ 时,其值为 1,当 $\tau < 0$ 时,其值为 0。

Step3 优化投影指数函数。当投影指标函数取得最大值时,所对应的 $\vec{a}$ 方向最能反映数据特征的最优投影方向。因此搜寻最优投影方向问题就转化成非线性最优解的问题,即:

$$\begin{cases} \max: Q(a) = S_z D_z \\ s.t: \sum_{j=1}^{m} (a)^2(j) = 1 a \in [0,1] \end{cases} \tag{6}$$

反之,当投影指标函数取得最小值时,所对应的 $\vec{a}$ 方向最能反映数据特征的最优投影方向。其公式为:

$$\begin{cases} \min: Q(a) = 1/(S_z D_z) \\ s.t: \sum_{j=1}^{m} (a)^2(j) = 1 a \in [0,1] \end{cases} \tag{7}$$

Step4 构造分级标准。利用公式(1)对各评价因子等级阈值进行归一化处理,将最佳投影方向 $\vec{a}$ 代入(2)得到各分级标准投影值 $z'(k)$, k 为分级数, $z'(k)$ 即为评价分级标准。

Step5 评价。同理,计算得到待评价因子投影值 $z(i)$,并依据 $z'(k)$ 进行评价。

与粒子群优化算法寻优结果相比,粒子群引力搜索算法巡游精度提高了 8 个数量级以上,4 个测试函数的寻优成功率也均为 100%,与标准引力搜索算法寻优结果相比,粒子群引力搜索算法中的 Quadric 函数的寻优精度比标准引力搜索算法提高了 15 个数量级以上。所以,PSOGSA-PP 模型利用粒子群引力搜索算法搜寻投影寻踪模型的最佳投影方向 $\vec{a}$,不但有效提高了投影寻踪模型的评价精度,而且为解决投影追踪模型最佳投影方向 $\vec{a}$ 提供了一种全新的途径和方法。其模型原理与实现步骤见图 1。

2　案例研究

2.1　京津冀地区水生态概况

京津冀地区位于海河流域的中下游,包括北京市、天津市以及河北省的保定、廊坊、唐山、张家口、承德、秦皇岛、沧州、衡水、邢台市、邯郸、石家庄等 11 个地级市,是全国主要的高新技术和重工业基地,也是我国政治、文化、经济、科技发展的核心区。属于“资源型”缺水地区,多年平均水资源总量分别为 32.9×10^8、14.3×10^8 m^3 和 198.3×10^8 m^3,据《2014 年中国水资源公报》显示,京津冀人均水资源占有量仅 286 m^3,为全国平均水平的 1/8,世界人均占有量的 1/32,也远低于联合国制定的人均 1000 m^3的缺水线。京津冀地区约为 $12\times10^4 km^2$,人口约为 9000 万,面积和水资源仅占全国的 2.3%和 1%,却承载着全国 8%的人口和 11%的经济总量[41]。据《2014 年环境质量公报》,京津冀水质相对较差,国控断面中,Ⅰ类水质断面占4.7%,同比上升 3.1 个百分点;Ⅱ类占 14.1%,同比下降 4.6 个百分点;Ⅲ类占 20.3%同比上升 1.6 个百分点;Ⅳ类占 14.1%,同比上升 4.7 个百分点;Ⅴ类占 9.3%,同比下降 3.2 个百分点;劣Ⅴ类占 37.5%,同比下降 1.6 个百分点,远远超过国家十大水系 13.7%的平均水平。由水利部水规总院调查整理的 2013 年京津冀供水结构表表明,京津冀地区水资源开发程度高达 109%,平水年份生态环境用水年均赤字近 90 亿 m^3,其中地下水 68 亿 m^3,年均挤占河湖生态用水量 15 亿 m^3,枯水年份挤占生态环境问题更加突出。京津冀一体化的提出意味着京津冀地区政策互动和资源

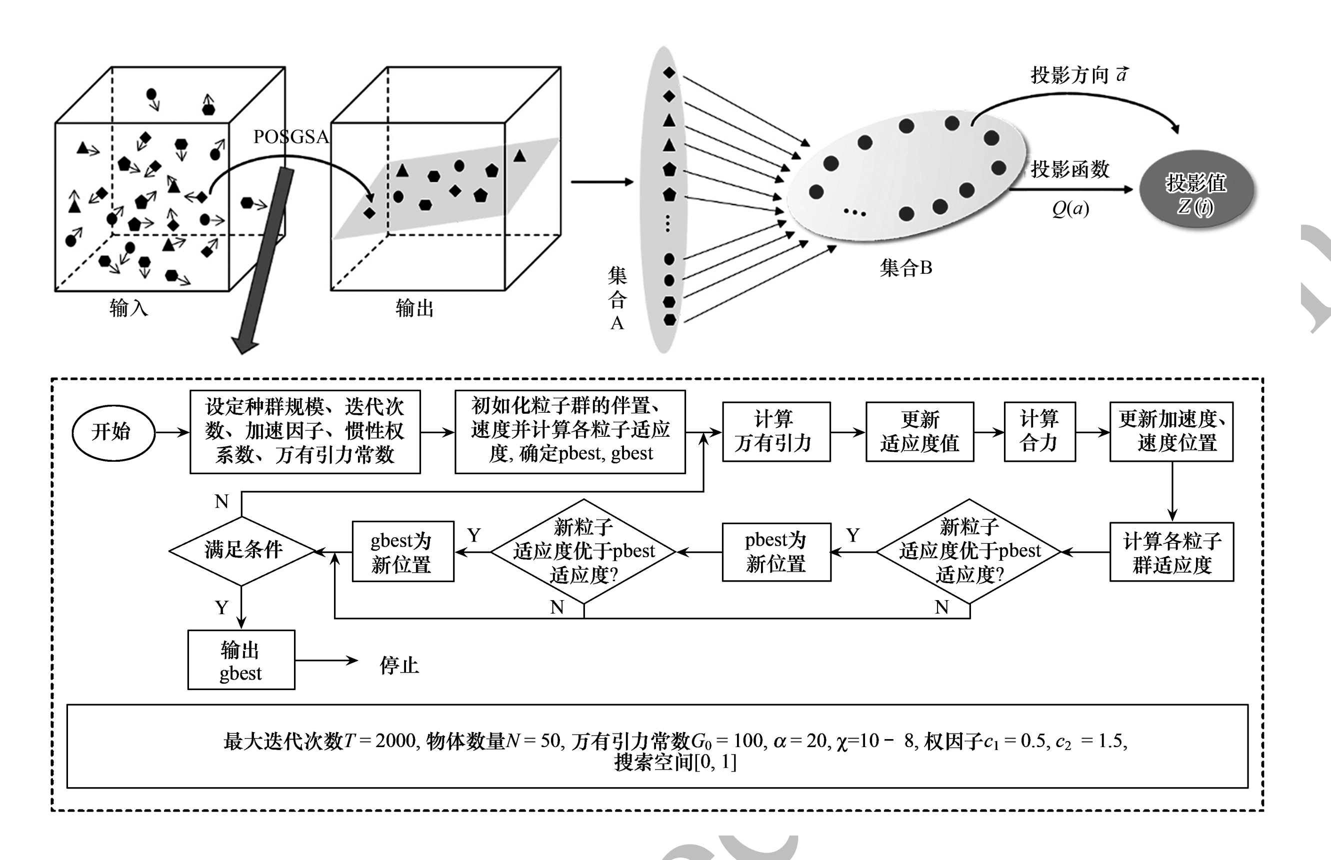


图 1 PSOGSA-PP 模型原理与技术路径图

Fig.1 The theory of PSOGSA-PP model and research flow chart

共享,但面临着水资源不匹配、降水时空分布不均、开发利用难度大、水质污染逐年加重和水资源配置能力不足等诸多问题。“十二五”以来,随着京津冀地区经济社会的快速发展,水资源供需矛盾日益突出,f 水污染日趋严峻,导致水生态系统结构、功能等随之发生变化。

2.2 情景方案设定与模拟

2008 年为保障北京奥运会成功举办,京津冀各地政府统筹协作以制度和政策为驱动力,在水生态保护、水环境健康、水生态安全以及水生态补偿措施等方面取得丰硕成果。2015 年颁布的《京津冀协同发展生态环境保护规划》指出,到 2020 年,京津冀地级及以上城市集中式饮用水水源水质全部达到或优于Ⅲ类,重要江河湖泊水功能区达标率达到 73%;同时,京津冀用水总量控制在 296 亿 m^3,地下水超采退减率达到 75%以上;到 2030 年,京津冀水生态承载能力、水生态文明水平将得到进一步提升,一体化协同水治理管控能力增强,应对风险能力和水安全保障程度提高,基本实现水利现代化。

基于水生态承载力的内涵,从已有成功经验、污染现状和环境治理水平以及政策规划等要素综合考虑,设定水生态承载力在“过去-现在-未来”的动态变化过程情景,历史年为 2008 年,基准年为 2014 年,规划水平年为 2020 年和 2030 年(表 3)。

2.3 优化结果与评价分析

依据 2.2 所收集各地区不同年份的指标参数值与水生态承载力优化模型(PSOGSA-PP),计算出水生态承载力评价指标最佳投影方向 $\vec{a}$,利用最佳投影方向 $\vec{a}$ 分别计算分级标准阈值投影值 $z'(k)$ 和京津冀各地区不同年份的投影值 $z''(k)$,利用 $z'(k)$ 确定水生态承载力评价等级,以下是京津冀地区 2008 年、2014 年、2020 年和 2030 年水生态承载力评价结果(图 2)。

京津冀地处海河流域,其中天津处在京津冀下游,为海河流域的入海口,北京市和河北省的大部分地区父亲位于上游,而承德市和张家口市又处于北京市上游,为北京重要的水源地。从图 2 可以看出,就 2008 年而

言,基于外来人口压力,产业结构不合理以及本身水资源匮乏等因素的多重胁迫,北京市水生态承载力为Ⅲ

表 3　京津冀地区水生态承载力情景方案

Table 3　Water ecological carrying capacity scenarios of Jing-Jin-Ji(Hebei Province)Region

方案名称 Scheme name	情景设计 Scenario design
历史成就 Historic achievement(2008)	奥运会成功举办年,京津冀率先采取跨界联动措施,人均水资源 293 m^3, Ⅰ—Ⅲ类水质断面占 28.6%;Ⅳ类水质断面占 14.3%、Ⅴ类水质断面占 6.3%;劣Ⅴ类水质断面占 50.8%。水资源相对较足,水环境得到明显改善。京津冀常住人口为 0.97 亿,GDP 总量占全国 11.3%万元 GDP 用水量达到 95 m^3以下
现状过渡 Current situation(2014)	"十二五"规划末期,京津冀一体化战略制定的一年,北京、天津和河北水污染防治考核结果均为差。京津冀人均水资源仅 239 m^3,地表水劣Ⅴ类(丧失使用功能的水)断面比例达 30%以上,受污染的地下水占三分之一;Ⅲ类以上污染水超过 60%,劣Ⅴ类水评价河长超过 45%;平原区河流普遍断流,湿地萎缩,功能衰退,河道淤积,地表水灌溉减少,地下水超采,地下漏斗分布广。京津冀常住人口为 1.1 亿,GDP 总量占全国 10.4%,万元 GDP 用水量约为 100 m^3
中期蓝图 Mid-blueprint(2020)	迎接 2022 冬奥会的攻坚阶段,京津冀将构建水资源统一调配管理平台,实行水量联合调度,人均水资源将达到 300 m^3,京津冀监测网全面建成水源水质全部达到或优于Ⅲ类,京津冀地区用水总量控制在 305.6 × $10^8 m^3$,地下水超采退减率达到 75%以上。京津冀常住人口将达到 1.2 亿,万元 GDP 用水量达到 80 m^3
长期愿景 Long-term vision(2030)	水生态文明提升年,基本实现水利现代化。用水效率和节水水平显著提高,京津冀地区用水总量控制在 339.8×10^8 m^3,水源地水质全部达到或者优于Ⅱ类,Ⅰ、Ⅱ类达标率占 90%以上。饮用水达标率 100%,人均水资源超过 300 m^3,万元 GDP 用水量控制在 50 m^3以下,常住人口控制在 1.1 亿以内

好的水生态环境不仅为奥运会的成功举办增添了优美的景观,也是奥运会成功举办的重要条件。但是位于北京下游的保定该模型所需数据和参数设定主要依据以下参考资料计算所得:《北京市城市总体规划(2004—2020)》、《天津市城市总体规划(2005—2020)》、《2008 年北京市环境保护工作总结》、《2015 年北京十三五规划建议全文》、《天津市十三五规划纲要全文》、《天津市未来科技城总体规划(2013—2030)》、《天津市国土规划(2002—2030)》、《河北省生态环境保护"十二五"规划》、《河北省十三五规划全文》、《京津冀协同规划纲要(全文)》、河北省《关于实施实行最严格水资源管理制度的意见》、《关于实施实行最严格水资源管理制度的意见》附件、《天津市污水处理及其再生水利用行业企业排名统计报告》、《2009 年—2013 年河北省污水处理及其再生利用行业年度经营状况统计分析报告》、河北省《污水垃圾处理专项提升行动工作方案》、《2008 年天津市环境状况公报》、《2014 年天津市环境状况公报》、《2008 年中国环境统计年鉴》、《2014 年中国环境统计年鉴》、《河北省人口战略发展研究报告》等[42-45]

级,处于临界状态;天津市和位于首都上游的张家口市、承德市水生态承载力均为Ⅱ级,处于比较理想状态;良市、衡水市和沧州市水生态承载力为Ⅴ级,出现严重超载的局面;廊坊市、邢台市和邯郸市也不容乐观,水生态承载力为Ⅳ级,表现为超载;石家庄市、唐山市和秦皇岛市相对居中,水生态承载力为Ⅲ级,处于临界状态。京津冀同属于海河流域为主体的半干旱地区,2008 年—2014 年间,河北平原过量开采地下水,导致地下超采区域漏斗达 20 多个,面积达 7×10^4km^2,由地下水面下降形成地下水降落漏斗,产生地面沉降达 9×10^4 km^2,年沉降速率大于 30mm 的严重沉降区面积约为 2.53×10^4 km^2,部分地区最大沉降量达到 160mm[46],沉降中心主要分布在沧州市、衡水市、邢台市和邯郸市境内,同时保定市也出现地下水超采和水质恶化情况。因此,2014 年京津冀水生态承载力较 2008 年,大部分地区出现下滑态势,北京市基于人口和经济转型的压力,表现为Ⅳ级,天津市和承德市为Ⅲ级,张家口市为仍呈现Ⅱ级,投影值达到全区域最大为 2.4688,沧州市、衡水市、邢台市和邯郸市为Ⅴ级,其余地区投影值均小于 2.1893 和北京一样同为Ⅳ级,。2020 年是《京津冀协同发展规划纲要》全面实施阶段,京津保中心区生态过渡带即将建成,同时也是 2022 北京—张家口国际冬奥会举办的攻坚阶段,京津冀将构建水资源统一调配管理平台和水环境统一监管制度,实行水量联合调度,水质统一评价。预计京津冀重点流域水质优良(达到或优于Ⅲ类)比例总体 70%以上,地级及以上城市黑臭水体均控制在 10%以内,地级及以上城市集中式饮用水水源水质达到或者优于Ⅲ类比例高于 93%,京津冀区域丧失使用功能(劣于Ⅴ类)的水体断面比例下降 15%左右。水生态承载力分级如下:北京市出现好转,投影值由 2.3573 上升为 2.3733,达到Ⅱ级临界值,但是呈现Ⅲ级,天津市、承德市和张家口市为Ⅱ级,达到较理想状态,投影值分别为 2.5032,2.4489 和 2.5804,沧州市、衡水市、邢台市和邯郸市地处河北平原地下水下渗漏斗带仍处于超载状态,评定为Ⅳ级,其余地区投影值均位于 2.3037 与 2.3896 之间评定为Ⅲ级。到 2030 年,京津冀地区将率先建

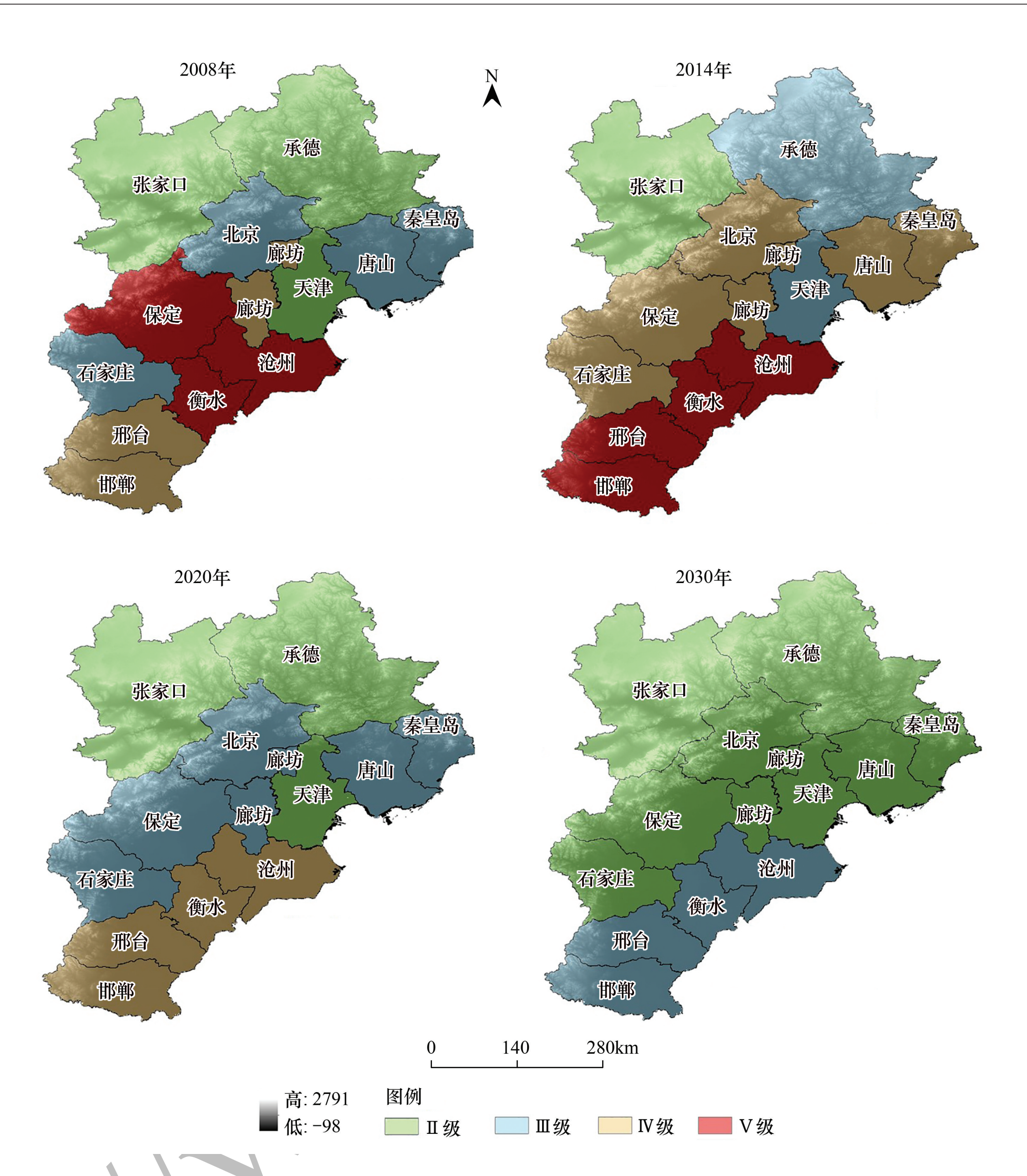


图 2　多元驱动模型下的京津冀水生态承载力分级评价

Fig.2　Water ecological carrying capacity evaluation in Jing-Jin-Ji (Hebei Province) area based the multivariate driven model

成节水型社会,一体化协同水生态管控能力进一步加强,重点流域水质优良比例总体 75%以上,城市建成区黑臭水体总体得到消除,地级及以上城市集中式饮用水水源水质达到或者优于Ⅲ类比例高于 95%左右,基本实现水利现代化。水生态承载力分级结果可以看出,各个地区的投影值 $z''(i)$ 均有所上升,除沧州市、衡水市、邢台市和邯郸市为Ⅲ级外,其余全部地区均为Ⅱ级。其中张家口市和承德市分别为 2.6878 和 2.7227,已经达到Ⅰ级的临界值。

3　结论

(1)本文利用水资源、水环境和社会经济数据来综合表征水生态承载力,选取具有独立性和代表性的参数构建评价指标体系,建立了多元驱动模型(PSOGSA-PP)模拟其相互关系和动态变化,并进行承载指数计算和分级评价,揭示了各地区是否超载以及超载程度问题,模拟预测了京津冀地区在 2008 年、2014 年、2020 年和 2030 年水生态承载力的演化态势。

(2)利用粒子群引力投影寻踪模型模拟结果表明,2008 年—2030 年京津冀所属 13 个地区的水生态承载

力在呈先恶化再逐步好转趋势(逐步由Ⅳ级、Ⅴ级趋于Ⅱ级)。2008 年—2014 年,河北省 GDP 总量的过快增长导致河北平原地下水严重超采区占 63.2%,一般超采区占 20.5%,严重影响了京津冀三地的水生态承载力。2014 年—2020 年,随着京津冀一体化战略的实施、"水十条"和最严格水资源管理制度的推行和水生态修复工作的完善,预期到 2030 年京津冀地区水生态整体将得到极大程度改善。

(3)由于京津冀地区长期受水资源短缺、水生态环境破坏、城市发展不平衡等因素制约,京津冀地区的总体水生态承载能力不容乐观。因此,水生态的改善必须按照分类、分区、分阶段的梯级模式逐步开展,水生态系统、水资源系统、水环境系统和社会经济系统之间存在着相互影响和相互作用关系,2008—2030 年京津冀 13 个市区水生态承载力的分级评价与发展态势,可望为水生态保护、水环境修复以及水资源可持续开发利用提供决策支撑。

参考文献(References):

[1] Peng J, Du Y Y, Liu Y X, Hu X X. How to assess urban development potential in mountain areas? An approach of ecological carrying capacity in the view of coupled human and natural systems. Ecological Indicators, 2016, 60: 1017-1030.

[2] 张林波, 李兴, 李文华, 王维, 刘孝富. 人类承载力研究面临的困境与原因. 生态学报, 2009, 29(2): 889-897.

[3] Chambers N, Simmons C, Wackernagel M. Sharing Nature's Interest: Ecological Footprints as an Indicator of Sustainability. New York: Routledge, 2000.

[4] 王西琴, 高伟, 张家瑞. 区域水生态承载力多目标优化方法与例证. 环境科学研究, 2015, 28(9): 1487-1494.

[5] 刘子刚, 蔡飞. 区域水生态承载力评价指标体系研究. 环境污染与防治, 2012, 34(9): 73-77.

[6] 焦雯珺, 闵庆文, 李文华, FULLER A M. 基于 ESEF 的水生态承载力: 理论、模型与应用. 应用生态学报, 2015, 26(4): 1041-1048.

[7] 夏军, 张永勇, 王中根, 李浩. 城市化地区水资源承载力研究. 水利學報, 2006, 37(12):1482-1488.

[8] Dessu S B, Melesse A M, Bhat M G, McClain M E. Assessment of water resources availability and demand in the Mara River Basin. Catena, 2014, 115: 104-114.

[9] Li G, Jin C L. Fuzzy comprehensive evaluation for carrying capacity of regional water resources. Water Resources Management, 2009, 23(12): 2505-2513.

[10] Feng L H, Zhang X C, Luo G Y. Research on the risk of water shortages and the carrying capacity of water resources in Yiwu, China. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2009, 15(4): 714-726.

[11] Wang T X, Xu S G. Dynamic successive assessment method of water environment carrying capacity and its application. Ecological Indicators, 2015, 52: 134-146.

[12] 赵卫, 刘景双, 苏伟, 窦晶鑫. 辽宁省辽河流域水环境承载力的多目标规划研究. 中国环境科学, 2008, 28(1): 73-77.

[13] Gao G Q. Water environmental carrying capacity calculation and protection measures on Hefang reservoir. Applied Mechanics & Materials, 2011, 90-93: 2537-2540.

[14] Moore J, Kissinger M, Rees W E. An urban metabolism and ecological footprint assessment of Metro Vancouver. Journal of Environmental Management, 2013, 124: 51-61.

[15] Weinzettel J, Steen-Olsen K, Hertwich E G, Borucke M, Galli A. Ecological footprint of nations: Comparison of process analysis, and standard and hybrid multiregional input-output analysis. Ecological Economics, 2014, 101: 115-126.

[16] 张万顺, 齐迪, 幸娅, 彭虹, 杨寅群. 区域水生态承载力的量化研究与应用. 武汉大学学报: 工学版, 2011, 44(5): 560-564.

[17] Zhang Z, Lu W X, Zhao Y, Song W B. Development tendency analysis and evaluation of the water ecological carrying capacity in the Siping area of Jilin Province in China based on system dynamics and analytic hierarchy process. Ecological Modelling, 2014, 275: 9-21.

[18] Wang S, Xu L, Yang F L, Wang H. Assessment of water ecological carrying capacity under the two policies in Tieling City on the basis of the integrated system dynamics model. Science of the Total Environment, 2013, 472: 1070-1081.

[19] 张星标, 邓群钊. 江西省水生态承载力分析. 南昌大学学报: 理科版, 2011, 35(6): 607-612.

[20] Zeng C, Liu Y L, Liu Y F, Hu J M, Bai X G, Yang X Y. An integrated approach for assessing aquatic ecological carrying capacity: a case study of wujin district in the Tai Lake Basin, China. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2011, 8(1): 264-280.

[21] Sun X, Xiong S, Zhu X J, Li Y F, Li B L. A new indices system for evaluating ecological-economic-social performances of wetland restorations and its application to Taihu Lake Basin, China. Ecological Modelling, 2015, 295: 216-226.

[22] 李靖, 周孝德. 叶尔羌河流域水生态承载力研究. 西安理工大学学报, 2009, 25(3): 249-255

[23] 王西琴, 高伟, 曾勇. 基于 SD 模型的水生态承载力模拟优化与例证. 系统工程理论与实践, 2014, 34(5): 1352-1360.

[24] 陈广洲, 汪家权, 解华明. 粒子群算法在投影寻踪模型优化求解中的应用. 计算机仿真, 2008, 25(8): 159-165.

[25] Yang J F, Lei K, Khu S, Meng W, Qiao F. Assessment of water environmental carrying capacity for sustainable development using a coupled system dynamics approach applied to the Tieling of the Liao River Basin, China. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(9): 5173-5183.

[26] 严子奇, 夏军, 左其亭, 张永勇. 淮河流域水环境承载能力计算系统的构建. 资源科学, 2009, 31(7):1150-1157.

[27] Yang J F, Lei K, Qiao F. An improved index system of regional water ecological carrying capacity evaluation: a case study of Tieling City, China. Advanced Materials Research, 2013, 869: 627-633.

[28] 唐克旺. 水生态文明的内涵及评价体系探讨. 水资源保护, 2013, 29(4): 1-4.

[29] 崔东文, 金波. 基于随机森林回归算法的水生态文明综合评价. 水利水电科技进展, 2014, (5): 56-60.

[30] Guo S L, Xu C Y, Chen H, Liu D D. Review and Assessment of Interaction between Watershed Hydrology and Society System. Journal of Water Resources Research, 2016, 5(1): 1-15.

[31] 杨俊峰, 乔飞, 韩雪梅, 柴淼瑞. 流域水生态承载力评价指标体系研究 // 2013 中国环境科学学会学术年会论文集(第六卷). 昆明: 中国环境科学学会, 2013.

[32] Jago-On K A B, Kaneko S, Fujikura R, Fujiwara A, Imai T, Matsumoto T, Zhang J Y, Tanikawa H, Tanaka K, Lee B, Taniguchi M. Urbanization and subsurface environmental issues: An attempt at DPSIR model application in Asian cities. Science of the Total Environment, 2009, 407(9): 3089-3104.

[33] 付强, 赵小勇. 投影寻踪模型原理及其应用. 北京: 科学出版社, 2006.

[34] 王柏, 张忠学, 李芳花, 孙艳玲, 丁红. 基于改进双链量子遗传算法的投影寻踪调亏灌溉综合评价. 农业工程学报, 2012, 28(2): 84-89.

[35] Huang K W, Chen J L, Yang C S, Tsai C W. A memetic gravitation search algorithm for solving clustering problems // 2015 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC). Sendai: IEEE, 2015.

[36] 张维平, 任雪飞, 李国强, 牛培峰. 改进的万有引力搜索算法在函数优化中的应用. 计算机应用, 2013, 33(5): 1317-1320.

[37] 刘勇, 马良. 非线性极大极小问题的混沌万有引力搜索算法求解. 计算机应用研究, 2012, 29(1): 47-48.

[38] 唐柱, 丁学明, 刘灿. 基于引力搜索和粒子群混合优化算法的 T-S 模型辨识. 上海理工大学学报, 2013, 35(4): 351-354.

[39] 李春龙, 戴娟, 潘丰. 引力搜索算法中粒子记忆性改进的研究. 计算机应用, 2012, 32(10): 2732-2735.

[40] 库路巴依·吾布力. 投影追踪模型在新疆农业灌溉用水系数影响因子分析中的应用. 水利规划与设计, 2016, (2): 21-23.

[41] 王晶, 李云鹤, 郭东阳. 京津冀区域水资源需求分析与供水保障对策. 海河水利, 2014, (3): 1-3.

[42] 张京成, 刘利永. 绿色奥运——一个碧水蓝天的承诺. 北京: 科学出版社, 2008.

[43] 孟庆华. 基于生态足迹的京津冀人口容量研究. 林业资源管理, 2014, (4): 8-13.

[44] 王少剑, 方创琳, 王洋. 京津冀地区城市化与生态环境交互耦合关系定量测度. 生态学报, 2015, 35(7): 2244-2254.

[45] 吴健, 昌敦虎, 孙嘉轩. 京津冀一体化进程中的水环境保护策略. 环境保护, 2014, 42(17): 34-37.

[46] 李新斗, 席志敏. 河北平原深层地下水开采程度评价. 南水北调与水利科技, 2013, 11(6): 129-132.